

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
14. Juli 2005 (14.07.2005)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2005/064634 A1

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: **H01H 57/00**,
H01L 41/09

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/IB2004/052881

(22) Internationales Anmeldedatum:
21. Dezember 2004 (21.12.2004)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
03104894.5 22. Dezember 2003 (22.12.2003) EP

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von
DE, US): **KONINKLIJKE PHILIPS ELECTRONICS
N.V.** [NL/NL]; Groenewoudseweg 1, NL-5621 BA Eind-
hoven (NL).

(71) Anmelder (nur für DE): **PHILIPS INTELLECTUAL
PROPERTY & STANDARDS GMBH** [DE/DE]; Stein-
damm 94, 20099 Hamburg (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **PELZER, Heiko**
[DE/DE]; c/o Prof. Holstlaan 6, NL-5656 AA Eindhoven
(NL). **STEENEKEN, Peter, G.** [NL/NL]; c/o Prof. Hol-
stlaan 6, NL-5656 AA Eindhoven (NL). **LEWALTER,
Astrid** [DE/DE]; c/o Prof. Holstlaan 6, NL-5656 AA
Eindhoven (NL).

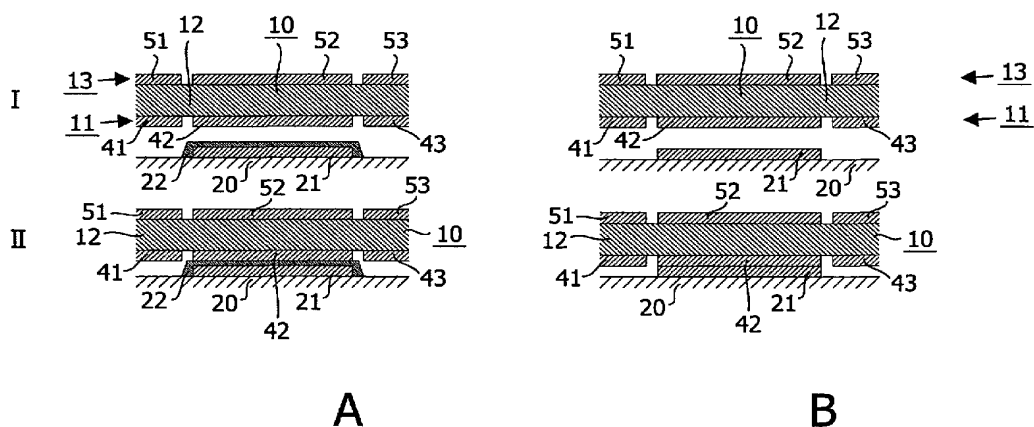
(74) Anwälte: **ELEVELD, Koop, J.** usw.; Prof. Holstlaan 6,
NL-5656 AA Eindhoven (NL).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,
CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES,
FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE,
KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: ELECTRONIC APPARATUS WITH A MICRO-ELECTROMECHANICAL SWITCH MADE OF A PIEZOELECTRIC MATERIAL

(54) Bezeichnung: ELEKTRONISCHES GERÄT MIT EINEM MIKRO-ELEKTROMECHANISCHEN SCHALTER AUS PIE-
ZOELEKTRISCHEM MATERIAL



(57) Abstract: An electronic apparatus contains a micro-electromechanical switch (MEMS) which comprises a piezoelectric element with a piezoelectric layer (12) between a first and a second electrode layers (11, 13), at least one of the electrode layers being structured into separate electrodes (41,42,43;51,52,53) that can be independently controlled.

(57) Zusammenfassung: Ein elektronisches Gerät enthält einen mikroelektromechanischen (MEMS) Schalter, der ein piezoelektrisches Element mit einer piezoelektrischen Schicht (12) zwischen einer ersten und einer zweiten Elektrodenschicht (11,13) umfasst, wobei zumindest eine der Elektrodenschichten zu separaten Elektroden (41,42,43;51,52,53) strukturiert ist, deren Potentiale unabhängig voneinander gesteuert werden können.

WO 2005/064634 A1



MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL,

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

ELEKTRONISCHES GERÄT MIT EINEM MIKRO-ELEKTROMECHANISCHEN SCHALTER AUS
PIEZOELEKTRISCHEM MATERIAL

Die Erfindung betrifft ein elektronisches Gerät mit einem
Mikroelektromechanischen Schalter, der umfaßt:

- ein piezoelektrisches Element mit einer piezoelektrischen Schicht, die sich zwischen einer ersten und zweiten Elektrodenschicht befindet;
- 5 - eine erste und eine zweite MEMS Elektrode, welche erste MEMS Elektrode sich an einer Oberfläche des piezoelektrischen Elementes befindet, und welche zweite MEMS Elektrode sich an der Oberfläche eines Substrates befindet, so dass sich die erste MEMS Elektrode unter Anwendung einer Aktuationsspannung auf das piezoelektrische Element von und/oder zu der zweiten MEMS Elektrode weg- bzw. hinbewegt.

10

Ein derartiges Gerät ist aus der Literatur bekannt. Mikro-Elektromechanische Schalter (MEMS) stellen eine interessante Alternative zu Halbleiterschaltern dar. Insbesondere die Aussicht, die intrinsische Kapazitäten der Halbleiterschalter zu vermeiden
15 und gleichzeitig geringere Durchgangswiderstände zu erreichen, haben MEMS in den letzten Jahren in den Mittelpunkt einer regen Forschungs- und Entwicklungstätigkeit gerückt. Erste Produkte werden zwar bereits verwendet, aufgrund der relativ hohen Schaltspannungen beschränken sie sich bisher aber auf Anwendungen, die diese zur Verfügung stellen können. An Lösungen, die bei Spannungen unterhalb von 5 V arbeiten besteht insofern besonderes
20 Interesse, als dass sich den MEM's damit das gesamte Gebiet der mobilen Telekommunikation erschließen würde. Aus diesem Grund wird verstärkt an Piezo-MEMS geforscht, da deutlich geringere Schaltspannungen benötigt werden als dies bei rein elektrostatisch geschalteten MEMS der Fall ist.

Figur 1 zeigt eine Prinzipskizze einer einseitig geklemmten und einer
25 zweiseitig geklemmten Platte aus Piezokeramik, dem Herzstück eines Piezo-MEMS. Das grundsätzliche Prinzip ist in beiden Fällen das gleiche. Auf der Piezokeramik 12 sind auf der Ober- und Unterseite Elektrodenschichten 11, 13 angebracht, die bei angelegter Spannung dafür sorgen, dass sich Piezokeramik zusammen zieht oder ausdehnt. Die Piezokeramik 12 bildet mit den Elektrodenschichten 11,13 das piezoelektrische Element. Dies ist mit einem

Substrat verbunden über einer oder mehreren Unterstützungen, woran das Element 10 an einer Seite 30, oder an zwei Seiten 30,31 geklemmt ist. Dabei wird in der dargestellten Konfiguration der d31 Piezokoeffizient verwendet, d. h. die Piezokeramik 12 ist entlang der Flächennormalen der Elektroden in +z-Richtung polarisiert. Die Biegung der Piezokeramik wird nun durch einen Gradienten in der Steifigkeit erzeugt. Dementsprechend können die Elektroden 11,13 auf der Ober- und Unterseite aus den gleichen Metallen bestehen, wobei sie dann aber unterschiedliche Schichtdicken aufweisen müssen. Eine andere Möglichkeit bildet die Verwendung unterschiedlicher Elektrodenmaterialien mit verschiedenen Steifigkeiten. Eine Kombination aus beiden Prinzipien ist ebenfalls möglich.

Figur 2 zeigt beide Schalter, wenn zwischen Oberseite und Unterseite eine Spannung angelegt wird. Der einseitig geklemmte Schalter hat den Vorteil, dass schon eine geringe Spannung ausreicht, um zu schalten (große Auslenkung bei geringer Spannung). Der zweiseitig geklemmte Schalter verspricht hingegen die größere mechanische Stabilität, benötigt aber eine deutlich höhere Spannung, um die gleiche Auslenkung zu erreichen wie der einseitig geklemmte Schalter. Betrachtet man den beidseitig geklemmten Schalter allerdings etwas näher, so zeigt sich, dass die Biegeform beim Anlegen der Spannung sehr ungünstig ist. Wie Figur 3 zeigt würde dieser Schalter nur an den Kanten geschlossen werden, was eine große Impedanz zur Folge haben würde. In dieser Konfiguration stellt der beidseitig geklemmte Schalter trotz seiner mechanischen Vorteile keine Alternative zum einseitig geklemmten Schalter dar.

Es ist daher ein Ziel der vorliegenden Erfindung, ein Gerät der in den Anfangsabsatz genannten Art vorzulegen, das einen MEMS-Schalter mit niedrigen Schaltspannungen und trotzdem einer guten mechanischen Stabilität ergibt.

Dieses Ziel ist dadurch erreicht worden, daß zumindest eine der Elektrodenschichten zu Elektroden strukturiert ist unter Definition eines Versetzungsgebiet im Piezoelektrischen Element, in welchem Versetzungsgebiet die erste MEMS Elektrode liegt und welches Versetzungsgebiet unter Anwendung von zumindest einer Aktuationsspannung auf die Elektroden im Verhältnis zum Rest des Piezoelementes stark versetzbar von und/oder zum Substrat ist.

In der Erfindung ist mindestens eine Elektrodenschicht strukturiert, und zwar so, dass nur ein Teil des piezoelektrischen Elementes verformbar ist. Nicht das ganze Element wird daher unter Anwendung einer Aktuationsspannung zum Substrat, und

besonders zur zweiten MEMS Elektrode gebracht, sondern nur ein spezifisches Teil, d.h. das Versetzungsgebiet. Besonders ermöglicht die Mehrzahl an Elektroden, daß nicht das ganze piezoelektrische Element ausgelenkt wird. Örtlich findet auch Zusammenziehen der Keramik statt. Besonders wird dies so gezielt gemacht, daß die erste MEMS Elektrode damit eine

5 flache Oberfläche hat.

Vorzugsweise ist die piezoelektrische Schicht in einem Polarisations-Modus bei der Herstellung polarisiert worden ist. Dazu sind die Elektroden derart definiert worden sind, daß örtlich eine Aktuationsspannung angebracht werden kann, die ein örtliches Zusammenziehen der piezoelektrischen Schicht bewirkt. Die Verwendung eines

10 Polarisations-Modus ist dem Fachmann im Gebiet der Piezokeramik an sich bekannt.

Üblicherweise werden dabei höhere Aktuationsspannungen und eine höhere Temperatur benutzt. Hier unterscheidet sich der Polarisations-Modus vom Arbeitsmodus dadurch, dass die Verteilung der Aktuationsspannungen über die Elektroden anders ist.

Besonders ist dieser Entwurf von Interesse für zweifach oder auch mehrfach geklemmten piezoelektrische Elemente. Gemeint ist mit den gegenüberliegenden Seiten nicht die üblich als Unter- und Oberseite gekennzeichnete Seiten, sondern die „Ränder“ oder die „auseinanderliegenden Enden“ des piezoelektrischen Elementes, wozwischen sich das verformbare piezoelektrische Element befindet, in einer ganz geöffneten Position wesentlich parallel zum Substrat. Das piezoelektrische Element ist also „beam-shaped“. Die Literatur

20 spricht auch von beidseitig geklemmt.

Es hat sich erwiesen, dass ein derartig doppelseitig geklemmtes (Englisch: clamped) piezoelektrisches Element zusammen in Kombination mit dem Elektrodenentwurf gute Verformungseigenschaften zeigt. so dass bei geringen Spannungen (<5V), Verformungen erreicht werden, die ausreichen, Schaltwege von mehr als 1µm zu überbrücken. Der

25 Schaltweg von 1µm ist für MEM-Schalter charakteristisch. Es ist günstig wenn die Elektroden dabei symmetrisch um das Versetzungsgebiet angeordnet sind.

Der Schalter kann sowohl ein kapazitiver wie ein galvanischer Schalter sein. Außerdem kann der Schalter als Resonator und als Sensor benützt werden. Der piezoelektrische Schicht enthält vorzugsweise ein Material mit Perowskitstruktur, wie zum

30 Beispiel die Materialien aus der Gruppe der Blei-Zirkonat-Titanate, und ähnlichem, dem Fachmann bekannt als PbZrTiO_3 , $\text{Pb}(\text{X}_a\text{Nb}_b)\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$, mit $a = 0.33$ oder 0.5 und $b = 1-a$ und $X = \text{In, Mn, Mg, Y, Er, Zn, Ni, Sc, oder anderes, und mit oder ohne Dotierungen von La, Mn, Fe, Sb, Sr, Ni, W oder Kombination davon. Solche Materialien können auf mehreren Weisen auf das Substrat gebracht werden, wie dem Fachmann bekannt. Das piezoelektrische$

Element kann weiterhin eine strukturellen Schicht umfassen, aber eine Asymmetry in der Steifigkeit kann ebenso mit unterschiedlichen Elektrodenschichten bewirkt werden. Verschiedene Möglichkeiten zu der Herstellung solcher MEMS Elemente sind weiterhin an sich bekannt.

5 In einer ersten Ausführungsform ist auch die zweite Elektrodenschicht in mehrere Elektroden unterteilt worden. Bevorzugt gibt es pro Schicht zumindest zwei Elektroden, deren Potential unabhängig voneinander gesteuert werden kann. Diese Ausführungsform kann in mehreren Konfigurationen verwendet werden.

10 In einer ersten Konfiguration befindet sich eine dielektrische Schicht auf der zweiten MEMS Elektrode, also der Gegenelektrode. Dabei kann sowohl die untere Mittenelektrode wie auch die obere Mittenelektrode des Piezoelektrischen Elementes das Signal führen. Im geschlossen Zustand wird das Signal kapazitiv in die zweiten MEMS Elektrode eingekoppelt. Allerdings ist das Dielektrikum dicker, wenn die obere Mittenelektrode das Signal führt, aber die kann auch einen geringen innerlichen Widerstand
15 haben, aufgrund der Schichtdicke und der Materialwahl.

 In einer zweiten Konfiguration gibt es keine dielektrische Schicht auf der zweiten MEMS Elektrode. Wenn die untere Mittenelektrode das Signal führt, ergibt sich im geschlossenen Zustand einen galvanischen Kontakt mit der zweiten MEMS Elektrode. Damit wird ein DC-Schalter ermöglicht. Wenn die obere Mittenelektrode das Signal führt, wird das
20 schon im offenen Zustand über das Dielektrikum in die untere Mittenelektrode eingekoppelt. Wird der Schalter geschlossen, so wird das Signal durch den Kontakt zur zweiten MEMS Elektrode (Gegenelektrode) kurzgeschlossen.

 In einer dritten Konfiguration ist der Schalter in einer derartigen Form ausgeführt dass das Signal über eine „Transmission Line“ geführt wird. Diese Transmission
25 Line kann unterbrochen sein, so dass die auf der Piezokeramik angebrachte ersten MEMS-Elektrode die Verbindung galvanisch oder kapazitiv über ein Dielektrikum schließt. Die Transmission Line kann aber auch ohne Unterbrechung durchlaufen. In diesem Fall wird das Signal bei einem Kontakt mit der auf der Piezokeramik angebrachte ersten MEMS-Elektrode die auch mit einem Dielektrikum bedeckt sein kann, galvanisch oder kapazitiv nach Masse
30 kurzgeschlossen wird.

 Bei der Steuerung werden zwei Modi unterschieden: ein Polarisationsmodus und ein Arbeitsmodus. Das Polarisationsmodus bewirke dass das Teil des piezoelektrischen Schichtes der zweiten MEMS Elektrode gegenüber in der entgegengesetzten Richtung gepolt ist, wie die Teile die nebenan geordnet sind.

Die MEMS-Schalter lassen sich in Bezug auf die Strukturierung der auf der Piezokeramik angebrachten Elektroden weiter differenzieren. In einer Ausführungsform ist die zweite Elektrodenschicht eine ununterbrochene Metallschicht, und die erste Elektrodenschicht zumindest drei Elektroden, wovon die mittlere gegenüber der zweiten MEMS Elektrode angeordnet ist. Auch hier lassen sich verschiedene Konfigurationen unterscheiden:

In einer ersten Konfiguration läuft das Signal bei geöffnetem Schalter entlang der durchgehenden Unterelektrode und wird bei geschlossenem Schalter galvanisch kurzgeschlossen (Figur 9A). In einer zweiten Konfiguration läuft das Signal bei geöffnetem Schalter entlang der durchgehenden Oberelektrode und wird bei geschlossenem Schalter kapazitiv über die Piezokeramik kurzgeschlossen (Figur 9B). In einer dritten Konfiguration läuft das Signal bei geöffnetem Schalter entlang der durchgehenden Unterelektrode und wird bei geschlossenem Schalter kapazitiv über die mit einem Dielektrikum bedeckte Gegenelektrode kurzgeschlossen (Figur 9C).

Auch in dieser Ausführungsform gibt es unterschiedliche Betriebsmodi, d.h. den Polarisationsmodus und den Arbeitsmodus.

In einer besonderen Variante dieser Ausführungsform sind die Elektroden auf der strukturierten Elektrodenschicht als sogenannte „Interdigitalelektroden“ ausgeführt. Die Spannung liegt nun zwischen den schmalen Elektroden an. Die Polarisierung der Piezokeramik ist dementsprechend weitestgehend in +x bzw. -x Richtung ausgerichtet. Das zur Aktuierung angelegte Feld ist nun parallel zur gewünschten Dehnung bzw. Kontraktion entlang der x-Achse. Der d33 Piezokoeffizient ist in diesem Fall für die erreichbare Auslenkung entscheidend. Dieser ist mehr als zweimal größer als der d31 Piezokoeffizient, was bei feiner Strukturierung der Elektroden und der Anpassung der Potentialfolge der Elektroden an das Krümmungsverhalten des Schalters noch größere Auslenkung bei kleinen Schaltspannungen ermöglicht.

Die Erfindung betrifft auch ein Verfahren zur Vorbereitung des MEMS-Schalters. Diese Vorbereitung ist wesentlich das Anlegen von Aktuierungsspannungen im Polarisations-Modus. Dieser Schritt ist eine günstige Weise um im piezoelektrischen Element örtlich und gezielt Zusammenziehen und Auslenken zu bewirken.

Die Erfindung betrifft weiter die Verwendung des MEMS-Schalters. In der Verwendung, auch dem Arbeits-Modus werden die Aktuierungsspannungen derart aufgelegt so as sich das Versetzungsgebiet nach Wunsch bewegt. Die Aktuierungsspannungen werden

üblicherweise von einer Ansteuereinrichtung (English: Driver und besonders Driving Integrated Circuit) angebracht.

- 5 Diese und andere Aspekte der Erfindung werden mit den folgenden Zeichnungen im Detail erläutert, worin:

Fig. 1 Prinzipskizzen eines einseitig bzw. zweiseitig geklemmten Piezo-MEM mit einer Elektrode auf der Ober- bzw. Unterseite zeigt,

- Fig. 2: eine Wiedergabe der Auslenkung beider Schalter zeigt, wenn eine
10 Spannung an die Elektroden angelegt wird,

Fig. 3: eine Wiedergabe der Auslenkung des beidseitig geklemmten Schalters aus verschiedenen Blickwinkeln zeigt. Das Biegeprofil zeigt einen ungünstigen Verlauf, da die Kontaktfläche durch die starke zusätzliche Krümmung in der Mitte sehr klein ist,

- Fig. 4: Prinzipskizze Schalter bzw. schaltbarer Kondensatoren nach einer
15 ersten Ausführungsform der Erfindung zeigt,

Fig. 5: Beidseitig geklemmter Schalter mit zwei Elektroden auf der Oberseite und zwei Elektroden auf der Unterseite zeigt,

- Fig. 6: den Schalter der Erfindung nach im Polarisations-Modus (links) bzw. Arbeitsmodus (rechts) zeigt. Die angegebene Spannungen sind exemplarisch, so können z. B.
20 die Seitenelektroden eine andere Spannung als die Mittelelektroden haben,

Fig. 7: das Biegeprofil des Schalters im Arbeits-Modus zeigt,

Fig. 8: Verschiedene Anschlusskonfigurationen der Elektroden zeigt,

Fig. 9: Prinzipskizze Schalter bzw. schaltbarer Kondensatoren der Erfindung nach einer zweiten Ausführungsform zeigt,

- Fig. 10: einen Schalter nach einer zweiten Ausführungsform zeigt;

Fig. 11: die Ansteuerung des Schalters der zweiten Ausführungsform zeigt;

Fig. 12: Verschiedene Anschlusskonfigurationen der strukturierten Elektrode
zeigt,

- Fig. 13 eine weitere Skizze des Schalters in der zweiten Ausführungsform
30 zeigt, und zwar in der besonderen Variante.

Fig. 14: Prinzipskizze des Schalters nach der besonderen Ausführungsforms zeigt, und zwar mit Verhalten in dem Polarisationsmodus (links) und Arbeitsmodus (rechts) . An der durchgehenden Unterelektrode liegt in beiden Fällen eine Spannung von 5 V an,

Fig. 15: Simuliertes Biegeprofil der zweiten Ausführungsform zeigt, und

Fig. 16: Simuliertes Biegeprofil der besonderen Variante der zweiten Ausführungsform zeigt.

5 Gleiche Referenznummer in unterschiedlichen Figuren verweisen nach gleichen Merkmalen. Die Figuren sind bloss skizzhaft. Der prinzipielle Aufbau des piezoelektrischen Schalters bzw. der schaltbaren Kapazität wird in Figur 4 dargestellt. Das MEMS-Element umfasst ein piezoelektrisches Element 10, mit einer ersten
10 Elektrodenschicht 11, einer piezoelektrischen Schicht 12 und einer zweiten Elektrodenschicht 13. Eine erste MEMS Elektrode 42 befindet sich an einer Oberfläche des piezoelektrischen Elementes 10. Eine zweite MEMS Elektrode 21, weiterhin auch Gegenelektrode genannt, befindet sich auf dem Substrat 20. Die erste und die zweite MEMS Elektroden 42, 21 sind so angeordnet, dass sie in einem geschlossenen Zustand des MEMS Elementes miteinander in Kontakt sind, entweder galvanisch oder kapazitativ. Das piezoelektrische Element 10 ist an
15 zwei Seiten 30, 31 an Unterstüttungen geklemmt. Die – nicht gezeigten – Unterstüttungen befinden sich auf dem Substrat 20.

 Die Figur 4A zeigt hierin einen Schalter mit einer dielektrischen Schicht 22 auf der zweiten MEMS Elektrode 21. Dies führt zu einem kapazitativen Kontakt im geschlossenen Zustand. Die Figur 4B zeigt hierin einen Schalter ohne dielektrischer Schicht
20 auf der zweiten MEMS Elektrode. Dies führt zu einem galvanischen oder kapazitativen Kontakt. Wenn die erste MEMS Elektrode 42 – auch untere Mittenelektrode genannt – direkt verbunden ist mit dem Eingang, ist der Schalter galvanisch. Führt aber die obere Mittenelektrode 52 das Signal, ergibt sich einen kapazitativen Schalter, auch wenn die erste und die zweite MEMS Elektrode 42,21 galvanisch miteinander verbunden werden.

25 Die Figuren 4A(I) und 4B(I) zeigen die Schalter im offenen Zustand, die Figuren 4A(II) und 4B(II) zeigen die Schalter im geschlossenen Zustand. Neben der unteren Mittenelektrode 42 sind in der ersten Elektrodenschicht 11 noch weitere Elektroden 41,43 angeordnet. In der zweiten Elektrodenschicht 13 befinden sich ebenfalls noch weitere Elektroden 51,53. Diese 41, 43, 51,53 werden im Betrieb auf eine Spannung gestellt die
30 unterschiedlich ist zu der Spannung der mittleren Elektrode 42,52. In dieser Art kann die Piezokeramik 12 vorteilhaft gebogen werden. Es ist nicht ausgeschlossen, dass die weitere Elektroden 41,43; 51,53 in einer Elektrodenschicht 11, 13 miteinander verbunden sind. Weitere Figuren zeigen weitere Konfigurationen dazu.

In einer günstigen Ausführungsform des Schalters der Erfindung wird als piezoelektrische Schicht 12 eine Schicht gewählt, die mit sol-gel Technologie nasschemisch aufgebracht werden kann. Ein günstiges Material ist zum Beispiel Blei-Lanthan Zirkonat-Titanat ($\text{PbLa}_{0,02}\text{Zr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47}\text{O}_3$), doch es sind dem Fachmann viele Alternative bekannt.

- 5 Solche ferroelektrische Schichten brauchen aber eine Wärmebehandlung bei höherer Temperatur, allgemein zwischen 500 und 900 °C. Dazu enthält vorzugsweise eine Elektrodenschicht Platin (Pt), welches diese Temperaturen durchsteht. Es gibt aber auch andere Möglichkeiten, wie z.B. leitende Oxiden. Für die andere Elektrodenschicht kann man Pt, aber auch Aluminium oder ein anderes gewünschtes Material wählen. Günstigerweise
10 werden Adhesionsschichten und Barrierschichten so weit wie notwendig verwendet, wie dem Fachmann bekannt. Üblicherweise wird ein MEMS-Schalter mit einem „Sacrificial Layer“ hergestellt, welche Opferschicht nachher durch Ätzen weggenommen wird. In dem Fall befindet sich die Pt-Schicht am nächsten zum Substrat. Alternativ kann man das piezoelektrische Element 10 separat herstellen und danach in einem Lötverfahren oder
15 ähnlichem Vorgang mit dem Substrat 20 verbinden. In dem Fall befindet sich die Pt-Schicht an der vom Substrat 20 abgekehrten Seite des piezoelektrischen Elementes 10.

- Figur 5 zeigt das piezoelektrische Element 10. Dies ist ein der Erfindung zu Grunde liegenden beweglichen Teil des Schalters; die zweite MEMS Elektrode 21 und das Substrat 20 sind nicht dargestellt. Der Aufbau des erfindungsgemäßen Schalters zeichnet sich
20 dadurch aus, dass auf mindestens eine Seite der Piezokeramik 12 mindestens zwei Elektroden aufgebracht sind, deren Potentiale unabhängig voneinander gesteuert werden können. In dieser Ausführungsform sind beide Elektrodenschichten 11,13 in drei Elektroden 41-43, 51-53 untergeteilt worden. Es ist in diesem Aufbau günstig, aber nicht unbedingt notwendig, dass der Elektrodenentwurf in der ersten Elektrodenschicht 11 dem der zweiten
25 Elektrodenschicht 13 vollkommen gleich ist. Zwischen der mittleren Obenelektrode 52 und den Seitenelektroden 51,53 kann eine Isolation angebracht sein, z.B. von Benzocyclobutan (BCB) oder ähnliches Material mit niedriger dielektrischer Konstante.

- Hat die Piezokeramik 12 die Länge 4L zwischen den beidseitigen Klemmungen 30,31, so beträgt die Länge der Seitenelektroden 41,43 vorzugsweise ca. L und
30 die Länge der Mittenelektrode ca. 2L, um eine möglichst große Auslenkung der Piezokeramik 12 bei geringer Schaltspannung zu erreichen. Der Isolationsspalt zwischen den Elektroden 41,42,43 sollte auf das technologische Minimum reduziert werden.

Die Elektrodenmaterialien werden so gewählt, dass die Elastizitätsmodulen möglichst unterschiedlich sind, da dies in Kombination mit den Schichtdicken der Elektroden

die Krümmung der Piezokeramik vergrößert. Die Unterelektrode 11 besteht bevorzugt aus Platin mit einem Elastizitätsmodul von 165 GPa und die Oberelektrode besteht gemäß obiger Ausführungen bevorzugt aus Aluminium, das ein Elastizitätsmodul von nur ca. 71 GPa hat. Konkret bedeutet dies, dass eine beidseitig geklemmte Piezokeramik von 200x50 µm mit einer Dicke von 0,5 µm eine Auslenkung maximale Auslenkung von 0,73 µm bei 1 V Spannung erreicht, wenn die Dicke der Unterelektrode aus Platin 0,1 µm beträgt und die Schichtdicke der Aluminium Oberelektrode 0,31 µm beträgt. Dies bringt eine Verbesserung von ca. 70 Prozent im Vergleich zu einer Platinoberelektrode mit optimierter Schichtdicke. Somit können bei gleicher Spannung höhere Schaltwege zurückgelegt werden oder gleiche Schaltwege bei geringerer Spannung. Ersteres vergrößert die potenzielle Kraft, die der Schalter auf die Gegenelektrode aufbringen kann, so dass ein besserer Kontakt gewährleistet wird, letzteres reduziert die Anforderungen an die Spannungsversorgung und erhöht somit den Einsatzbereich dieser Mikroschalter.

Figur 6 zeigt den piezoelektrischen Element 10 erneut, wobei die Steuerspannungen wiedergegeben sind. Dabei werden zwei unterschiedliche Modi unterschieden. Der erste Modus, der Polarisations-Modus wird angewendet zum Einstellen der Piezokeramik 12. Das findet vorzugsweise statt direkt nach der Herstellung der Schichten des piezoelektrischen Elementes 10. Dabei werden höhere Spannungen und höhere Temperatur verwendet. Gerade bei der Herstellung ist dies noch möglich, weil dann noch kein Package oder sonstige Schichten angebracht sind, die begrenztere Temperaturstabilität besitzen als das piezoelektrische Element 10. Der zweite Modus ist der Arbeitsmodus, also der Modus der während der Verwendung vorliegt.

Figur 6A zeigt die Anlegung der Steuerspannungen im Polarisations-Modus. Hierin wird die Piezokeramik in -z-Richtung gepolt, d. h. die Elektroden in der ersten Elektrodenschicht 11 befinden sich auf einem Potential, die sich vom Potential der Elektroden in der zweiten Elektrodenschicht 13 unterscheidet. In diesem Fall ist der Potential auf der ersten Elektrodenschicht 11 0 Volt, und auf der zweiten Elektrodenschicht 5V. Bemerkt wird dass hier und sonst die Spannung von 5 V nur ein Beispiel zeigt.

Figur 6B zeigt die Anlegung der Steuerspannungen im Arbeitsmodus. Hierin alterniert die Spannungsfolge: die untere Mittenelektrode 42, sowie die Seitenelektroden 51,53 in der zweiten Elektrodenschicht 13, befindet sich auf 5 V. die Seitenelektroden 41, 43 in der ersten Elektrodenschicht 11, sowie die obere Mittenelektrode 52, befinden sich auf 0V.

Die Spannungsabfolgen von Polarisationsmodus und Arbeitsmodus können auch vertauscht werden, so dass die Piezokeramik z. B. an den Seiten in +z-Richtung gepolt ist und unterhalb der Mittenelektroden in -z-Richtung.

- Diese Elektrodenkonfiguration in Verbindung mit der Auswahl der
- 5 Elektrodenmaterialien und deren Schichtdicken bewirken zusammen mit der oben beschriebenen Beschaltung, dass die Piezokeramik an beiden Rändern rechtsgekrümmt und in der Mitte linksgekrümmt ist. Das Krümmungsverhalten der Piezokeramik entspricht somit dem durch die Randbedingungen (beide Seiten des Schalters fixiert) aufgezwungene und wird durch die Wahl der Elektrodenmaterialien unterstützt. Dies vergrößert die Auslenkung
- 10 des Schalters bei gleicher Spannung. Simulationen mit dem Softwaretool Ansys 6.0 ergaben für eine doppelseitig geklemmte Piezokeramik mit den oben beschriebenen Abmessungen 200 μm x 50 μm und einer Spannung von Schaltspannung von 1 V eine etwa fünfmal größere Auslenkung als bei durchgehender Ober- bzw. Unterelektrode aber ansonsten optimierten Elektrodenmaterialien und Schichtdicken (Figur 3). Des weiteren verändert sich das
- 15 Biegeprofil in der Art, dass eine große Kontaktfläche und somit eine sichere Kontaktierung gewährleistet ist (Figur 7). Die beschriebene Konfiguration lässt sich ebenfalls als eine Elektrode einer steuerbaren Kapazität verwenden.

- Nahezu unabhängig von den Elektrodenmaterialien erreicht die Auslenkung der beidseitig geklemmten Piezokeramik mit einer bevorzugten Schichtdicke zwischen 0.3
- 20 μm und 1 μm (dünner, wenn technologisch möglich) ihr Maximum, wenn das Verhältnis der Schichtdicken der Elektroden zwischen 1 zu 2 bzw. 1 zu 6 liegt.

- Figur 8 zeigt verschiedenen Konfigurationen, um die geteilten Elektroden anzusteuern. Die linke Hälfte der Darstellung zeigt jeweils die Unterseite der mit Elektroden (schraffiert) bedeckten Keramik, während auf der rechten Seite die Oberseite zeigt. In der
- 25 obersten Konfiguration laufen die Elektroden über die gesamte Breite der Piezokeramik. Die Elektroden auf der Unterseite sind spiegelbildlich zu denen auf der Oberseite angebracht, damit die Kräfte im Material symmetrisch bleiben. In der mittleren Konfiguration wird die Mittenelektrode nur von einer Seite angeschlossen. Auch hier sind die Elektroden auf der Unterseite aus Symmetriegründen wieder spiegelsymmetrisch angeordnet. In der unteren
- 30 Anordnung ist die Mittenelektrode der Oberseite mit einem dritten Fußpunkt verbunden. Diese Konfiguration bietet die Möglichkeit das Signal über eine breite Leitung mit geringen Verlusten zur Mittenelektrode zu übertragen (Aus Symmetrie kann auch ein weiterer Fußpunkt hinzugefügt werden).

Figur 9 und weitere Figuren zeigen eine zweite Ausführungsform des Schalters der Erfindung. In dieser Ausführungsform ist nur eine der beiden Elektrodenschichten 11,13 in mehreren Elektroden unterverteilt worden. Auch diese Ausführungsform enthält den wichtigen Merkmal, dass der Ansteuerung der Elektroden im Polarisationsmodus (zum Einstellen der Piezokeramik) und im Arbeitsmodus (zur Biegung der Piezokeramik) unterschiedlich sein kann; und zwar so, dass nicht nur die angelegte Spannungen, sondern auch die Verteilung der Spannungen über die Elektroden unterschiedlich sind. Im Arbeitsmodus wird die durchgehende Elektrode, d.h. die nicht strukturierte Elektrodenschicht das Signal führen.

Figur 9 zeigt einen prinzipiellen Aufbau eines piezoelektrischen Schalters bzw. der schaltbaren Kapazität in der zweiten Ausführungsform der Erfindung. Bei diesem gibt es verschiedene Konfigurationen, die dadurch charakterisiert sind, dass die durchgehende Elektrode das Signal führt:

Figur. 9A zeigt einen Schalter mit einer durchgehenden, ununterbrochenen Unterelektrode 11. Bei geöffnetem Schalter läuft das Signal entlang dieser Unterelektrode 11. Bei geschlossenem Schalter wird das Signal galvanisch kurzgeschlossen oder eingekoppelt. Diese Unterelektrode 11 ist damit auch die erste MEMS Elektrode

Figur. 9B zeigt einen Schalter mit einer durchgehenden, ununterbrochenen Oberelektrode 13. Bei geöffnetem Schalter läuft das Signal entlang der durchgehenden Oberelektrode und wird bei geschlossenem Schalter kapazitiv über die Piezokeramik kurzgeschlossen oder eingekoppelt.

Figur. 9C zeigt einen anderen Schalter mit einer durchgehenden, ununterbrochenen Unterelektrode 11. In diesem Fall gibt es ein Dielektrikum 22 auf die zweite MEMS-Elektrode 21 auf dem Substrat 20. Das Signal läuft bei geöffnetem Schalter entlang der durchgehenden Unterelektrode und wird bei geschlossenem Schalter kapazitiv über die zweite MEMS-Elektrode 21 kurzgeschlossen oder eingekoppelt.

Kurzgeschlossen heißt, dass das Signal an Masse weitergeleitet wird. Wird das Signal eingekoppelt, so ist die zweite MEMS-Elektrode mit einer Signalleitung verbunden.

Figur 10 zeigt das piezoelektrische Element 10 dieser Ausführungsform. Der Aufbau des erfindungsgemäßen Schalters zeichnet sich dadurch aus, dass auf einer Seite der Piezokeramik 12 mindestens zwei Elektroden aufgebracht sind, deren Potentiale unabhängig voneinander gesteuert werden können. Die Elektrode auf der anderen Seite der Piezokeramik ist hingegen durchgehend.

Hat die Piezokeramik die Länge $4L$, so beträgt die Länge der Seitenelektroden ca. L und die Länge der Mittenelektrode ca. $2L$, um eine möglichst große Auslenkung der Piezokeramik bei geringer Schaltspannung zu erreichen. Der Isolationsspalt zwischen den Elektroden sollte auf das technologische Minimum reduziert werden.

- 5 Die Elektrodenmaterialien werden so gewählt, dass zum einen eine möglichst große Auslenkung erreicht wird, zum anderen die Leitfähigkeit des Materials, das für die durchgehende Metallisierung verwendet wird, möglichst groß ist. Bevorzugt würde Platin als dünne strukturierte Elektrode verwendet werden und eine dickere Aluminiumschicht als unstrukturierte Elektrode. Insbesondere für die unstrukturierte Elektrode bieten sich aber
10 auch Materialien mit einer höheren elektrischen Leitfähigkeit wie Kupfer, Silber oder Gold an.

- Nahezu unabhängig von den Elektrodenmaterialien erreicht die Auslenkung der beidseitig geklemmten Piezokeramik mit einer bevorzugten Schichtdicke zwischen $0.3\text{ }\mu\text{m}$ und $1\text{ }\mu\text{m}$ (dünner, wenn technologisch möglich) unter Verwendung dieser
15 Elektrodenkonfiguration ihr Maximum, wenn das Verhältnis der Schichtdicken der Elektroden zwischen 1 zu 2 bzw. 1 zu 10 liegt.

- Figur 11 zeigt in ihren Skizzen A und B die angelegten Spannungen in den zwei Betriebsmodi. Im Polarisations-Modus (Figur 11A) wird die Piezokeramik im Bereich der Seitenelektroden in $+z$ -Richtung (oder umgekehrt) gepolt während sie im Bereich der
20 Mittenelektrode in $-z$ -Richtung (oder umgekehrt) gepolt wird, d. h. das Potential der strukturierten Elektroden auf z. B. der Unterseite der Piezokeramik alterniert. Bei der Herstellung werden somit mindestens drei verschiedene elektrische Potentiale benötigt. Im Arbeitsmodus werden hingegen nur noch zwei verschiedene Potentiale benötigt (Figur 12 rechts).

- 25 Die Spannungsabfolgen von Polarisationsmodus und Arbeitsmodus können prinzipiell auch vertauscht werden, was allerdings größere Ansprüche an die Steuerelektronik in der Applikation stellt. Die angegebenen Spannungen von 5 V und 0 V sind nur exemplarisch gemeint. Es können auch andere Spannungen gewählt werden. Besonders ist gesagt, daß die Spannungen im Polarisations-Modus höher sein können als die im
30 Arbeitsmodus. Dazu kann es wohl sein, daß die Spannungen auf die Elektroden, wo die Keramik sich unter die Spannungen zusammenzieht, kleiner sind als die auf die Elektroden, wo die Keramik sich ausdehnt. In dem Beispiel ist die mittlere Elektrode 42 in der Gegenrichtung polarisiert durch Anlegung von einem negativen Potential im Polarisations-Modus. Es ist dabei zum Beispiel möglich, daß die Steuerspannung auf die mittlere

Unterelektrode 42 im Arbeitsmodus statt 5 V nur 3 V oder sogar 1 V beträgt. Es sei nämlich zu verhindern, daß die Steuerspannung in der Gegenrichtung der Polarisierung die Piezokeramik umpole.

Figur 12 zeigt verschiedene Konfigurationen, um die strukturierte Elektrode
5 anzusteuern. Die Kontaktierung der Mittenelektrode 42 kann mittels sehr schmaler Verbindungen 42A erfolgen, da über diese kein Signal geleitet wird. Der Einfluss auf die Auslenkung der Piezokeramik 12 wird somit minimiert. In der Anordnung von Figur 12A ist die Mittenelektrode 42 mit einem dritten Fußpunkt 45 verbunden.

Eine weitere Variante dieser Ausführungsform eines doppelseitig geklemmten
10 Schalters, die eine komplette Metallisierung einer Seite der Piezokeramik ermöglicht, ist in Figur 13 dargestellt. Figur 13B zeigt dabei ein Detail von Figur 13A, das dazu dient, die Polarisierung in der Piezokeramik zu erläutern. Im Vergleich zur zuvor beschriebenen Konfiguration, die den d_{31} Piezokoeffizienten zur Auslenkung des Schalters ausnutzt, wird in diesem Fall der d_{33} Piezokoeffizient ausgenutzt. Der Vorteil besteht darin, dass bei
15 gleicher elektrischer Spannung die Verformung der Piezokeramik 12 entlang der Polarisierungsachse ca. dreimal größer ist als diejenige senkrecht zur Polarisierungsachse. Dieser Vorteil kommt insbesondere bei einer sehr feinen Strukturierung der strukturierten Elektrode 13 zum Tragen. Das ist in diesem Beispiel die obere Elektrode 13, aber kann auch die untere Elektrodenschicht 11 sein. Insbesondere ist hier als obere Elektrode eine
20 Platinschicht gewählt und als untere Elektrode eine Aluminiumschicht. Dies paßt bei einem Verfahren, in dem das piezoelektrische Element erst nach der Herstellung mit dem Substrat zusammengefügt wird.

Die Spannungsabfolge ist so gewählt, dass sich die Piezokeramik an den Seiten entlang der Polarisationsachse ausdehnt. Da die elektrische Feldstärke an der
25 Oberseite der Piezokeramik zwischen den Elektroden mit unterschiedlichen Potentialen maximal ist, dehnt diese sich am stärksten aus, so dass die Piezokeramik im Seitenbereich nach unten gekrümmt ist. Dieser Effekt wird dadurch verstärkt, dass sich die Piezokeramik unterhalb der Oberelektroden in die vertikale Richtung ausdehnt und somit in der lateralen zusammenzieht. Wegen der größeren Steifheit der oberen dünnen Pt-Elektrode als der
30 unteren dickeren Aluminiumelektrode, ist auch dieser Bereich nach unten gekrümmt. Durch den Wechsel in der Spannungsabfolge wechselt in der Mitte der Piezokeramik das Krümmungsverhalten.

Die Auslenkung des Schalters lässt sich auch bei dieser Konfiguration optimieren, indem das Krümmungsverhalten der Piezokeramik an die beidseitige Klemmung

- angepasst wird. Dies geschieht durch die Veränderung der Spannungsabfolge zwischen 1/10 bzw. 4/10 bevorzugt $\frac{1}{4}$ der Gesamtlänge der Piezokeramik und zwischen 6/10 bzw. 9/10 bevorzugt $\frac{3}{4}$ der Gesamtlänge der Piezokeramik. Dementsprechend ist es, wie in Figur 9 dargestellt, erforderlich, dass die Spannungsabfolge im Polarisierungsmodus und
- 5 Arbeitsmodus unterschiedlich ist. Eine Vertauschung der beiden Modi ist ebenfalls möglich. Des Weiteren können die Spannungen in Abhängigkeit von der Polarisierung der Piezokeramik im Arbeitsmodus auch unterschiedlich gewählt werden, so dass die Spannung an den Seiten der Piezokeramik zwischen z. B. 5 V und 0 V variiert und in der Mitte z. B. zwischen 1 V und 0 V (oder umgekehrt), um Depolarisationseffekte zu vermeiden.
- 10 Das Potential der durchgehenden Kontaktelektrode ist, um eine maximale Auslenkung bei kleinen Spannungen zu erhalten, so zu wählen, dass die Verformung der Piezokeramik unterhalb der strukturierten Elektroden in Verbindung mit den Steifigkeiten und Schichtdicken der Elektroden die Auslenkung der Piezokeramik unterstützt.
- Ist der Schalter ohne angelegte Spannung offen, d. h. die Piezokeramik ist
- 15 nicht ausgelenkt, so ist Polarisierung und Spannungsabfolge so abzustimmen, dass die komplett metallisierte Oberfläche der Piezokeramik bei Anlegen der Arbeitsspannung nach außen gewölbt ist. Alternativ kann die Piezokeramik auch mechanisch vorgespannt sein, so dass der Schalter ohne Arbeitsspannung schließt. In diesem Fall ist die Polarisierung und Spannungsfolge so abzustimmen, dass die komplett metallisierte Oberfläche der
- 20 Piezokeramik bei Anlegen der Arbeitsspannung nach innen gewölbt ist.
- Figur 14 zeigt in Obenansicht ein Beispiel der Elektrodenkonfiguration der zweiten Elektrodenschicht 13, wobei zwischen den strukturierten Elektrode die piezoelektrische Schicht 12 sichtbar ist. Angegeben ist dazu die Steuerung, die auf die Elektroden gebracht wird. In der Figur 14A wird die Ansteuerung im Polarisations-Modus
- 25 gezeigt und in der Figur 14B die Ansteuerung im Arbeitsmodus. Wie bei den bereits besprochenen Figuren, sind diese Ansteuerungen unterschiedlich; nicht nur oder sosehr der Größe der Spannungen nach, sondern auch der Verteilung über die Elektroden nach. In Figur 14A ist die Verteilung (in einem ähnlichen Durchschnitt wie gezeigt in Figur 13): 0V-5V-0V-5V-0V-5V-0V-5V-0V. Im Polarisationsmodus wird also vor allem die
- 30 Piezokeramik in der Richtung in der Fläche des piezoelektrischen Elementes gepolt (in der Richtung der d_{33} Koeffizient). In Figur 14B ist die Verteilung, wie in Figur 13: 0V-5V-0V-0V-5V-0V-5V-0V-5V-0V. Dies ist kein bloss alternierendes Muster, sondern ein Muster aufgeteilt in drei Teilen. Durch den Übergang treten Kräfte auf, die gegen die Polarisationsrichtung hinein gehen. In diesem Fall findet das am Rande statt. Dadurch zieht

sich die Piezokeramik örtlich zusammen, wobei sie sich auf andere Stellen ausdehnt. Diese Abwechslung von Zusammenziehen und Ausdehnen sorgt für den Bewegung des piezoelektrischen Elementes 10 in die Richtung hin zu oder weg von der zweiten MEMS Elektrode auf dem Substrat.

- 5 Alle Konfigurationen der zweiten Ausführungsform in Verbindung mit der Auswahl der Elektrodenmaterialien und deren Schichtdicken bewirken zusammen mit der oben beschriebenen Beschaltung, dass das Krümmungsverhalten der Piezokeramik zwischen den Rändern und der Mitte wechselt. Dementsprechend wird den Randbedingungen (beide Seiten des Schalters fixiert) genüge getan. Durch die Wahl der Elektrodenmaterialien wird
10 dieses Verhalten noch unterstützt. Dies vergrößert die Auslenkung des Schalters bei gleicher Spannung. Die resultierenden Biegeprofile beider Konfigurationen sind in den Figuren 15 und 16 zu sehen.

Die beschriebene Konfiguration lässt sich ebenfalls als eine Elektrode einer steuerbaren Kapazität verwenden.

- 15 Zusammengefaßt:

- Die Erfindung beschreibt einen neuartigen, zweiseitig geklemmten Piezo-Elektromechanischen-Schalter (P-MEMS), der trotz einer extrem kleinen Baugröße aufgrund seines besonderen Elektrodendesigns in Verbindung mit der darauf abgestimmten elektronischen Ansteuerung, dem Elektrodenmaterial und deren Schichtdicke in der Lage ist,
20 Schaltwege von mehreren μm zu überwinden. Gleichzeitig ergibt sich eine sehr ebene Kontaktfläche was zu einer Verbesserung des Kontaktes führt. Im Vergleich zu einseitig geklemmten Schaltern ist eine deutlich erhöhte mechanische Stabilität gewährleistet.

- Der Vorteil Piezo-Elektromechanischen-Schalter (P-MEMS) ist eine Reduktion der Schaltspannung auf weniger als 5 V. Dies ermöglicht den Einsatz solcher
25 Komponenten in mobilen Applikationen. Neben diesem Aspekt ist es von größter Wichtigkeit die Verluste so gering wie möglich zu gestalten. Die beschriebene Erfindung trägt allen diesen Forderungen Rechnung.

- Dies wird dadurch erfaßt, daß die Piezokeramik lokal angesteuert wird und zwar so, dass unter Anwendung Aktuationsspannungen sich in der Piezokeramik Kräfte in
30 entgegengesetzten Richtungen bilden. Dies führt zu einem Übergang in der Keramik zwischen Ausdehnung und Zusammenziehen. Dadurch entsteht unterschiedliche Krümmungen. Im Falle eines zweiseitig geklemmten Elementes sind dies eine Linkskrümmung und eine Rechtskrümmung. Im Falle eines mehrfach geklemmten Elementes sind dies vorzugsweise zweimal eine Linkskrümmung und eine Rechtskrümmung, einmal die

X-Achse entlang, einmal die Y-Achse entlang (beide in der Fläche der Piezokeramik). Die Kräfte in entgegengesetzten Richtungen treten auf, da die Piezokeramik vorab, in einem Polarisations-Modus polarisiert worden ist. Eine Aktuierungsspannung die gegen die (örtliche) Polarisationsrichtung angebracht wird, sorgt dabei für ein Zusammenziehen, eine

- 5 Aktuierungsspannung die in der Polarisationsrichtung ist angebracht, sorgt für Ausdehnung.

In der ersten Ausführungsform gibt es strukturierte Elektroden an beiden Seiten des piezokeramischen Schichtes, wodurch Teile der Piezokeramik auf unterschiedliche Weise angesteuert werden können.

- 10 In der zweiten Ausführungsform wird durch eine komplette Metallisierung einer Seite der Piezokeramik der Widerstand dieser signalführenden Metallschicht des doppelseitig geklemmten Schalters drastisch verringert. Gleichzeitig ermöglicht das spezielle Elektrodendesign trotz einer extrem kleinen Baugröße (z. B. $200\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$), Schaltwege von mehreren Mikrometern bei einer Schaltspannung von weniger als 5 Volt zu überwinden und gewährleistet, aufgrund der Abstimmung des Krümmungsverhaltens der Piezokeramik
15 auf die (doppelseitige) Klemmung, einen großflächigen und somit verlustarmen Kontakt zur Gegenelektrode.

- In eine besonders günstige Variante der zweiten Ausführungsform ist die Obenelektrode 13 sehr fein strukturiert, d.h. dass sie viele parallele Linien darin definiert sind, die auf unterschiedliche Potentiale gesetzt werden können. Damit kann die
20 Piezokeramik lokal angesteuert werden, und kann dabei nicht nur die Piezokoeffizient d_{31} in der Richtung normal zum piezoelektrischen Element ausgenutzt werden, sondern auch die Piezokoeffizient d_{33} in der Fläche des piezoelektrischen Elementes. Daraus ergibt sich eine viel größere Ausdehnung.

- In einer weiteren Variante ist die zweite MEMS Elektrode 21 auf dem Substrat
25 20 ausgebildet als eine Transmission Line. Die dafür benötigte Grundfläche ist befindet sich im Substrat 20. Die erste MEMS Elektrode kann dabei als Relay entworfen worden sein (d.h. als eine Überbrückung zweier Teile der Transmission Line). Die Transmission Line kann aber auch ununterbrochen sein, wobei das MEMS Element mit einem Dielektrikum auf dem zweiten MEMS Elektrode ein Kondensator ist.

- 30 In beiden Ausführungsformen sind außerdem die Elektrodenschichten 11,13 derart ausgebildet, daß die Spannungsverteilung im Polarisations-Modus unterschiedlich sein kann von der im Arbeitsmodus. Im Polarisationsmodus kann die Piezokeramik 12 für optimale Auslenkung eingestellt werden. Im Arbeitsmodus wird dann die Auslenkung erreicht, unter Verwendung von eher geringen Steuerspannungen. In der zweiten

Ausführungsform ist es vorteilhaft, drei unterschiedliche Potentiale anzulegen im Polarisationsmodus. Im Arbeitsmodus dergleichen reichen aber zwei Potentiale aus.

- Weiterhin ist es vorteilhaft, dass die piezoelektrische Schicht 12 auch als Kopplungsfläche ausgenutzt werden kann. Besonders hochfrequente Signale können in einer
- 5 Elektrodenschicht 11,13 angeführt werden, in der sie nur einen geringen Innenwiderstand haben. Durch Kopplung über der piezoelektrischen Schicht kann dann das Signal weiter übertragen werden. Dank der hohen dielektrischen Koeffizient der Piezokeramik - einer Grösse ϵ_r von über 1000 ist durchaus erreichbar – wird das hochfrequente Signal nicht wesentlich gestört. Besonders günstig ist es dabei, daß die zweite Elektrodenschicht ganz
- 10 oder zum größten Teil in Aluminium ausgeführt worden ist, und vorzugsweise auch noch eine Dicke von über 0,5 μm , besonders etwa 1 μm oder mehr.

ANSPRÜCHE:

1. Elektronisches Gerät mit einem Mikroelektromechanischen Schalter, der folgendes umfaßt:
 - ein piezoelektrisches Element (10) mit einem piezoelektrischen Schicht (12), der sich zwischen einer ersten und zweiten Elektrodenschicht (11,13) befindet, in jeder dieser
 - 5 Elektrodenschichten (11,13) ist mindestens eine Elektrode angeordnet(52, 42);
 - eine erste und eine zweite MEMS Elektrode (42,21), welche erste MEMS Elektrode (42) sich an einer Oberfläche des piezoelektrischen Elementes (10) befindet und welche zweite MEMS Elektrode (21) , die sich an der Oberfläche eines Substrates (20) befindet, so dass sich die erste MEMS Elektrode (42) unter Anwendung einer
 - 10 Aktuationsspannung auf das piezoelektrische Element (10) von und/oder zu der zweiten MEMS Elektrode (21) weg- bzw. hinbewegt,
 - dadurch gekennzeichnet, daß zumindest eine der Elektrodenschichten (11,13) zu Elektroden (41-43; 51-53) strukturiert ist unter Definition eines Versetzungsgebiet im Piezoelektrischen Element (10), in welchem Versetzungsgebiet die erste MEMS Elektrode
 - 15 (42) liegt und welches Versetzungsgebiet unter Anwendung von zumindest einer Aktuationsspannung auf die Elektroden (41-43, 51-53) im Verhältnis zum Rest des Piezoelementes (10) stark versetzbar von und/oder zum Substrat (20) ist.
2. Gerät nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet daß die piezoelektrische
- 20 Schicht (12) in einem Polarisations-Modus bei der Herstellung polarisiert worden ist, und dass die Elektroden derart definiert worden sind, daß örtlich eine Aktuationsspannung angebracht werden kann, die ein örtliches Zusammenziehen der piezoelektrischen Schicht (12) bewirkt.
- 25 3. Gerät nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet daß die piezoelektrische Schicht (12) an der einer Seite des Versetzungsgebiet linksgekrümmt ist, und an einer gegenüberliegenden Seite rechtsgekrümmt.
4. Gerät nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet daß das piezoelektrische

Element (10) an einer ersten und einer zweiten gegenüberliegenden Seite (30, 31) an mechanischen Unterstützungen verbunden ist.

5. Gerät nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet daß die Elektroden
- 5 symmetrisch um das Versetzungsgebiet definiert worden sind.
6. Gerät nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet daß die erste und die zweite Elektrodenschicht je mindestens zwei Elektroden enthalten.
- 10 7. Elektronisches Gerät nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet daß die zweite Elektrodenschicht (13) ein ununterbrochene Metallschicht ist und der erste Elektrodenschicht (11) zumindest drei Elektroden (41,42,43) enthält, wovon die mittlere (42) sich wesentlich gegenüber der zweiten MEMS Elektrode (21) angeordnet ist.
- 15 8. Elektronisches Gerät nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet daß der erste Elektrodenschicht (11) an der Oberfläche angeordnet ist, die nach der zweiten MEMS Elektrode (21) aussieht.
- 20 9. Verfahren zur Vorbereitung eines elektronischen Gerätes nach Anspruch 1, wobei das piezoelektrische Element (10) unter Anwendung von Aktuationsspannungen auf die Elektroden in ein Polarisations-Modus gebracht wird, worin die piezoelektrische Schicht (12) derart polarisiert wird, daß beim Anlegen von passenden Aktuationsspannungen im Arbeitsmodus die piezoelektrische Schicht (12) örtlich ausgedehnt und örtlich zusammengezogen wird.
- 25 10. Verwendung eines elektronischen Gerätes nach Anspruch 1, wobei die Aktuationsspannungen derart auf die Elektroden angelegt werden, daß die piezoelektrische Schicht (12) örtlich ausgedehnt und örtlich zusammengezogen wird.
- 30 11. Verwendung nach Anspruch 10, wobei die Aktuationsspannung die ein örtliches Zusammenziehen der piezoelektrischen Schicht bewirkt, niedriger ist als die Aktuationsspannung in der Richtung der bereits eingebrachten Polarisation.